DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/4

УДК 574.572



ВОССТАНОВЛЕНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ ПОСЛЕ ГЕРБИЦИДНОГО СТРЕССА

Лариса В. Брындина[1] ✉, bryndinv@mail.ru, 0000-0001-2345-6789,
Ирина Д. Свистова[2], i.svistova@mail.ru 0000-0003-0275-5645,
Ольга В. Бакланова[1], baklanova.olga.72@mail.ru, 0000-0002-2762-3668

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия*

[2]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет», ул. Ленина, 86, г. Воронеж, 394043, Россия*

В данной работе представлены результаты исследования влияния углеродного сорбента (биочара) из осадков сточных вод и древесных опилок на восстановление почвенного микробиома после гербицидного воздействия. На уровне рода в исходной почве было обнаружено 28 представителей, из которых 35,7 % составили аэробы. Из них преобладали бактерии *Gaiella* и *Methylotenera*. Из анаэробных больше всего было *Veillonella* и *Faecalibacterium*. Доля подверженных влиянию гербицида микроорганизмов составила 71,4 %. Исчезли полностью из почвенного микробного сообщества 32 %, восстановились после внесения биочара – 39,3 %. Наблюдалось восстановление практически до первоначального значения микроорганизмов родов *Veillonella, Faecalibacterium, Gaiella, Ilumatobacter, Gemmatimonas*, численность *Azotobacter* увеличилась в 7,3 раза. В почве, подвергнутой обработке гербицидом, снижается или полностью исчезает доля микроорганизмов, проявляющих каталазную активность. Представители рода *Gaiella*, известные как каталазоположительные бактерии, отсутствовали в почве с гербицидом. После обработки почвы биоуглем их популяция возобновилась. *Intrasporangium,* также, будучи каталазоположительными, сократились более чем в 4 раза под действием гербицида. Очистка почвы биосорбентом позволила восстановить их численность на 56 %. Внесение в почву биоугля из осадков сточных вод и древесных опилок активизировало почвенную микробиоту. Оценка α-разнообразия по индексу Шеннона показала снижение видового разнообразия микробного сообщества почвы, обработанной гербицидом, в 1,5 раза. Очистка почвы биочаром восстанавливала почвенный микробиом, при этом индекс Шеннона составил 2,4.

Ключевые слова: почвенный микробиом, биочар, осадки сточных вод, биосорбент, гербицид, клопиралид ландфарминг, ремедиация почв

Благодарности: Авторы благодарят рецензентов и редактора за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Брындина, Л. В. Восстановление микробиологической активности почв после гербицидного стресса / Л. В. Брындина, И. Д. Свистова, О. В. Бакланова // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 2 (46). – С. 43–55. – *Библиогр.: с. 53–55 (19 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/4.

Поступила: 24.05.2022 ***Принята к публикации***: 29.06.2022 ***Опубликована онлайн***: 01.07.2022

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

RESTORATION OF SOIL MICROBIOLOGICAL ACTIVITY AFTER HERBICIDE STRESS

LarisaV. Bryndina[1] ✉, bryndinv@mail.ru, 0000-0001-2345-6789,
Irina D. Svistova[2], i.svistova@mail.ru 0000-0003-0275-5645,
Olga V. Baklanova[1], baklanova.olga.72@mail.ru , 0000-0002-2762-3668

[1] *Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*
[2] *Voronezh State Pedagogical University, Lenin str., 86, Voronezh, 394043, Russian Federation*

Abstract

This paper presents the results of a study of carbon sorbent from sewage sludge and sawdust (biochar) effect on the restoration of soil microbiome after herbicide treatment. At the genus level, 28 representatives were found in the original soil, 35.7% of which were aerobes. Of these, Gaiella and Methylotenera predominated. Of the anaerobic - most were Veillonella and Faecalibacterium. The proportion of microorganisms affected by the herbicide was 71.4%. 32% completely disappeared from the soil microbial community, 39.3% recovered after the introduction of biochar. There was a recovery almost to the original value of microorganisms of the genera Veillonella, Faecalibacterium, Gaiella, Ilumatobacter, Gemmatimonas. The number of Azotobacter increased by 7.3 times. In the soil subjected to herbicide treatment, the proportion of microorganisms exhibiting catalase activity decreases or completely disappears. Members of the genus Gaiella, known as catalase-positive bacteria, were absent in herbicide-treated soil. Their population resumed after soil treatment with biochar. Intrasporangium, also being catalase positive, were reduced by more than 4 times under the action of the herbicide. Cleaning the soil with a biosorbent made it possible to restore their numbers by 56%. The introduction of biochar from sewage sludge and sawdust into the soil activated the soil microbiota. The assessment of α-diversity by the Shannon index showed a 1.5-fold decrease in the species diversity of the microbial community of the soil treated with the herbicide. Cleaning the soil with biochar restored the soil microbiome, with a Shannon index of 2.4.

Keywords: soil microbiome, biochar, sewage sludge, biosorbent, herbicide, clopyralid landfarming, soil remediation

Acknowledgement: authors thank the reviewers and the editor for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Bryndina L. V., Svistova I. D., Baklanova O. V. (2022) Restoration of soil microbiological activity after herbicide stress. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 2 (46), pp. 43-55 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/4.

Received: 24.05.2022 ***Revised***: 25.06.2022 ***Accepted***: 29.06.2022 ***Published online***: 01.07.2022

Введение

Земли сельскохозяйственного назначения часто граничат с лесными насаждениями и лесополосами. Регулярная обработка сельхозземель гербицидами может привести к серьезным отрицательным изменениям лесных земель, гибели полезных микроорганизмов, ухудшению самоочищающей способности почв.

Влияние токсикантов на почвенные микроорганизмы, устойчивость микробных популяций в изменяющихся условиях изучено недостаточно. Имеются лишь единичные публикации, касающиеся общих для различных

почв паттернов (шаблонов) изменений сообществ в ходе сукцессий при смене факторов среды [1].

Для интенсификации процесса восстановления почв от пестицидов целесообразно активизировать аборигенную почвенную микрофлору за счет применение сорбентов нового поколения (биосорбентов).

Активизировать почвенный микробиоценоз возможно путем внесения доступных питательных веществ. Многие исследователи указывают на увеличение активности почвенных ферментов при внесении в них растительных остатков, компостов, органических удобрений, торфа, других органических материалов с высокой поглотительной способностью, что может ускорить процесс разложения гербицида [2]. Наиболее привлекательно использовать в этом направлении органосодержащие отходы агропромышленного комплекса. Исследования ученых Курской сельскохозяйственной академии [3] показывают положительное влияние биосорбентов на почвенные процессы и гумусообразование.

Поиски новых сорбентов для этих целей позволили нам обратить внимание на осадки сточных вод (ОСВ). Однако, не смотря на доказанное положительное действие осадков сточных вод в почве, применение их по-прежнему ограничено. В большинстве случаев это связано с правовыми вопросами регулирования по использованию ОСВ потенциальными потребителями. Решение данной проблемы возможно при переработке ОСВ в биоуголь(биочар) [4-6].

Биочар – это углеродный многофункциональный продукт, способный решать комплекс проблем, связанных с оздоровлением почвы [7,8].

Биоуголь получают пиролизом органических отходов при температуре не выше 800^{0}С и низком (лучше в отсутствии) содержании кислорода [9-13].

Чаще всего в качестве источников для получения биоуглей используют отходы деревообрабатывающей промышленности, растительные остатки (солома злаковых культур, стебли кукурузы, рисовой шелухи, скорлупа различных орехов, а также навоз и водоросли) [14].

Применение агросорбентов для детоксикации почв в настоящее время начинает пользоваться приоритетом. Этому способствует их высокая сорбционная способность. Установлено, что внесение биоугля в почву улучшает ее структуру, повышает влагоемкость, активизирует микробиологические процессы [15-17].

Кроме того, биочар способствует восстановлению почвенного углерода (секвестрации) и снижению его концентрации в атмосфере за счет трансформации в органическое вещество. Перевод атмосферного углекислого газа в органическое вещество растений с последующей трансформацией в почвенное органическое вещество растягивает период его разложения от нескольких сотен до тысячи лет, что сокращает выбросы CO_2.

Таким образом, активные угли (АУ) можно считать универсальным средством для восстановления загрязненных почв от остаточного содержания гербицидов.

В связи с этим **целью** работы является выявление закономерностей изменений почвенных микробных сообществ в условиях гербицидного загрязнения с применением ландфарминга биочаром из осадков сточных вод.

Материалы и методы

Почвенные образцы обрабатывали гербицидом «Хакер» (действующее вещество – клопиралид) в рекомендуемой дозе. В опытные пробы вносили биочар в количестве 10 % к массе сухой почвы. Контролем служила почва, не обработанная гербицидом и не содержащая биоуголь. Все пробы выдерживали 20 суток, после чего проводили секвенирование.

Биочар был получен карбонизацией сырья при температуре 500-700 ^{0}С без доступа кислорода. В качестве сырья использовали осадки сточных вод и древесные опилки (любых лиственных пород) в соотношении 3:1. Влажность исходного сырья: осадки сточных вод - 50-55%, древесные опилки – 8-10 % (рис. 1).

Основные показатели биочара приведены в табл. 1.

Секвенирование проводилось на платформе IonTorrent PGM с использованием реактивов и систем Ion PGM Hi-Q View Sequencing Kit, Ion OneTouch 2 System, and Ion PGM Hi-Q View OT2 Kit (Thermo Fisher Scientific, USA).

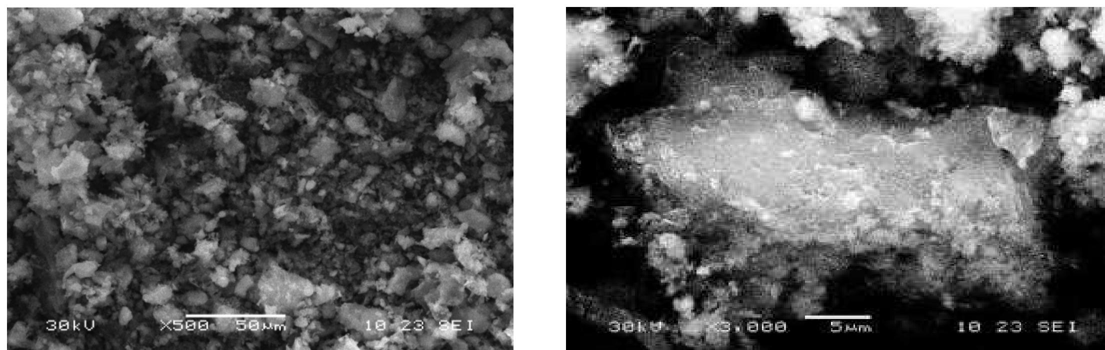


Рис. 1. Электронная микрофотография биочара из ОСВ и древесных опилок
Figure 1. Electronic micrograph of a biochar made of OSV and sawdust
Источник: собственные экспериментальные данные
Source: own experimental data

Таблица 1

Физико-химические характеристики биочара

Table 1

Physico-chemical characteristics of biochar

Показатели| Indicators	Биочар из ОСВ и древесных опилок| Biochar made of OSV and sawdust
Насыпная плотность, г/дм^3 | Bulk density, g/dm^3	380-400
Углерод, %| Carbon, %	79,0 – 86,5
Азот, %| Nitrogen, %	0,5-0,7
Фосфор, %| Phosphorus, %	1,5-2,0
Кальций, %| Calcium, %	8,5-12,0
Калий, %| Potassium, %	1,8-5,2
Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г| Adsorption activity by methylene blue, mg/g	67,5- 81,9
Адсорбционная активность по йоду, %| Adsorption activity by iodine, %	65-70

Источник: собственные экспериментальные данные
Source: own experimental data

После количественного анализа библиотеки систему Ion OneTouch ™ 2 (Thermo Fisher Scientific) использовали для приготовления обогащенных частиц, содержащих клонально-амплифицированные библиотеки ДНК, с использованием набора Ion PGM ™ Template OT2 400 Kit. Степень обогащения сфер находилась в оптимальном диапазоне 10–30 % и составила 13 %. После чего было проведено секвенирование, в соответствии с протоколом.

Результаты секвенирования были получены в формате BAM и были преобразованы в формат FASTQ с помощью программного обеспечения SAMtools v.1.2.

Демультиплексирование выполнялось с помощью приложения fastq-multx пакета программ ea-utils v.1.3. Чтения были отфильтрованы в соответствии с качеством на основе ожидаемого количества ошибок с использованием максимального ожидаемого отсечения ошибок 1.0. Поиск OTU производился с использованием алгоритма UNOISE2. Фильтрация считываний, идентификация уникальных последовательностей и кластеризация для поиска OTU выполнялись с использованием программного обеспечения USEARCH v.10.0.240 или VSEARCH v.2.8.2. Таксоны микроорганизмов в образцах были идентифицированы с использованием базы данных SILVA v.123.

Определение α-разнообразия проводили по индексу Шеннона. Индекс разнообразия Шеннона предполагает, что виды попадают в выборку из неопределеннобольшой генеральной совокупности, причем все виды генеральной совокупности представлены в выборке. Неопределенность в этом случае будет максимальной, когда все события (N) будут иметь одинаковую вероятность наступления (p_i =1/N). По мере увеличения частоты некоторых событий неопределенность уменьшается и становится равной нулю в случае, если остается лишь одно событие, и вероятность его наступления равна 1. Индекс Шеннона рассчитывали по формуле

$$H = - \sum p_i \ln p_i \quad ,$$

где p_i - доля особей i-го вида в генеральной совокупности, определяемая по доли вида в выборке как n_i/N.

Результаты и обсуждение

Во всех почвенных процессах ведущая роль принадлежит микроорганизмам. Несмотря на различные стрессовые факторы (температура, влажность, кислотность, воздействие гербицидов и т.д.) бактериальные сообщества поддерживают высокую стабильность почвенных экосистем. Почвенное микробное сообщество характеризуется высоким таксономическим и функциональным разнообразием. Большинство метагеномных исследований почвы связано с оценкой последствий антропогенного воздействия, которые не могут не влиять на структуру почвенных микробных сообществ. Почвенный метагеном, реагируя на эти изменения, может играть роль биоиндикатора.

Особо отметить следует относительно небольшую часть микробного сообщества почв, которым отводится главная биоиндикационная роль. Использование в качестве «фингерпринта» (индивидуального отпечатка) почвенного микробиома определенной экологической ниши зависит в большей степени от этого меньшенства, а не от доминирующих сообществ.

Молекулярно-генетические исследования почвы показали, что в составе контрольного почвенного микробиологического сообщества были обнаружены представители 7 фил: Firmicutes, Bacteroidota, Proteobacteria, Actinobacteriota, Gemmatimonadota, Desulfobacterota, Verrucomicrobiota (рис. 2). Преобладали типы Firmicutes и Actinobacteriota. Хотя, по данным многих исследователей [18, 19] основным бактериальным филумом в почве являлись Protobacteria и Actinobacteriota.

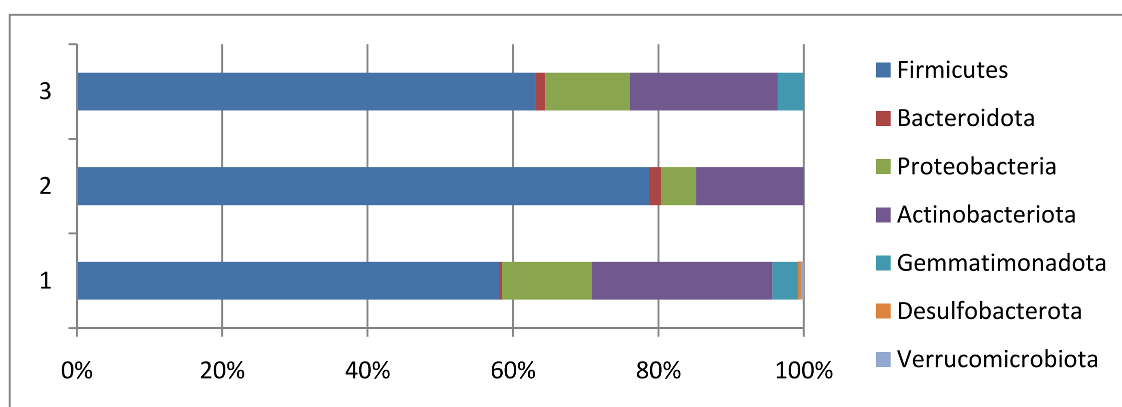


Рис. 2. Соотношение основных филумов микробиоты: 1 - почва;
2 – почва, обработанная гербицидом; 3 – почва, обработанная гербицидом + биочар

Figure 2. The ratio of the main phylum of microbiota: 1 - soil;
2 – soil treated with herbicide; 3 – soil treated with herbicide + biochar
Источник: собственные экспериментальные данные
Source: own experimental data

После обработки почвы гербицидом доля Firmicutes увеличилась на 20,6 %. Скорее всего, неблагоприятные условия от последействия гербицида спровоцировали их рост, так как большинство Firmicutes – спорообразующие, что дает им преимущество при выживании в неблагоприятных условиях. Количество микроорганизмов типа Bacteroidota после гербицидного воздействия увеличилось в 4 раза. Возможно, стрессовая ситуация спровоцировала у бактерий этого типа синтез ферментов, катализирующих процессы трансформации гербицида. Численность бактерий типов Proteobacteria и Actinobacteriota снизились в 2,5 и 1,7 раза соответственно. Исчезли микроорганизмы филумов Gemmatimonadota, Desulfobacterota, Verrucomicrobiota, играющие важные экологические функции в почве. Ранее исследователями с помощью высокопроизводительного секвенирования гена 16S рРНК удалось установить, что члены типа Gemmatimonadetes широко распространены в почве. Роль представителей этого филума может быть так же велика, как и типов Proteobacteria и Actinobacteriota. Desulfobacterota восстанавливают сульфат. Биогенный сероводород играет важную роль в связывании металлов в различных типах экоситем в виде сульфидов. Verrucomicrobiota, являясь хемоорганогетеротрофами, играют важную экологическую функцию в почве, способны усваивать различные сахара. Видимо, присутствие в почве гербицида привело к снижению устойчивости экосистемы почвы.

Анализ состава почвенного микробиома на уровне класса показал, что гербицид угнетал рост Negativicutes (тип Firmicutes), Clostridia (тип Firmicutes), Gammaproteobacteria (тип Proteobacteria). Численность Negativicutes сократилась в 6,7 раза, Clostridia – в 2,5 раза, Gammaproteobacteria – в 1,9 раза. Внесение в загрязненную клопиралидом почву биочара привело к восстановлению этих бактерий практически до первоначального состояния (рис. 3).

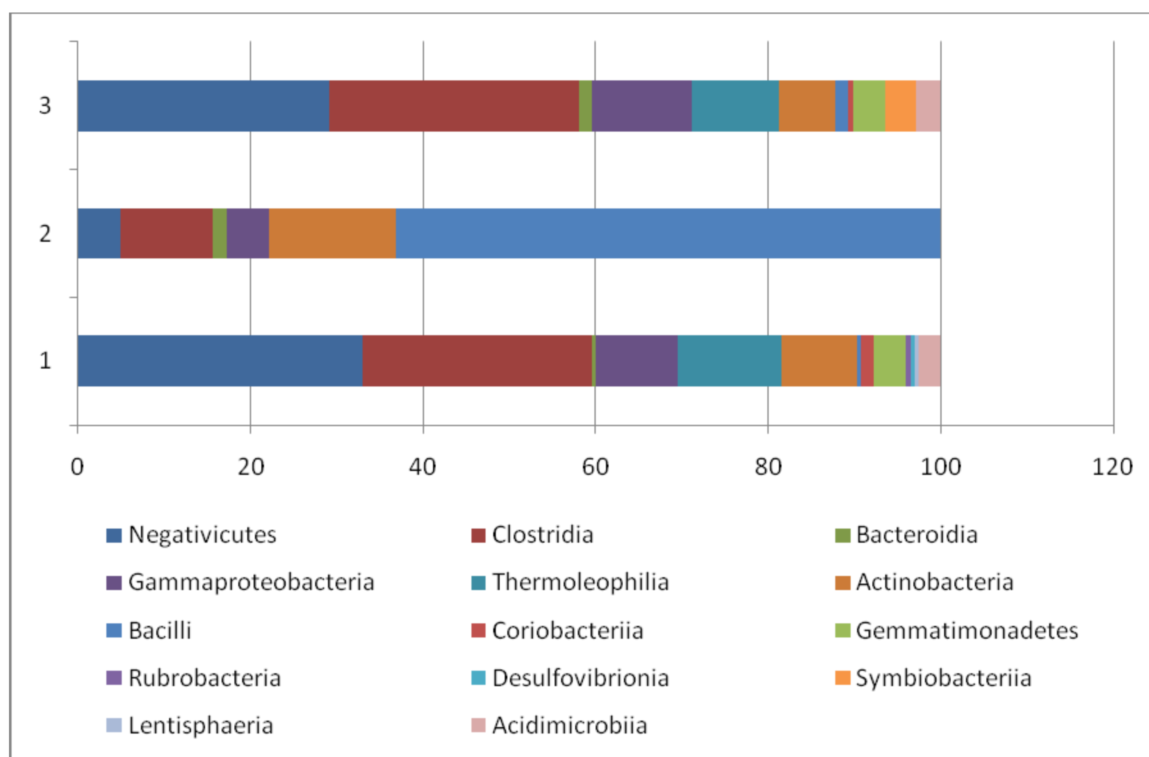


Рис. 3. Таксономический профиль почвенного микробиома, определенный до уровня класса, % :
1 – почва; 2 – почва, обработанная гербицидом; 3 – почва, обработанная гербицидом, + биочар
Figure 3. Taxonomic profile of the soil microbiome, defined up to class level, %:
1 – soil; 2 – soil treated with herbicide; 3 – soil treated with herbicide + biochar
Источник: собственные экспериментальные данные
Source: own experimental data

В то же время присутствие токсиканта в почве увеличило содержание в ней бактерий класса Bacilli (тип Firmicutes) на 62,7 % и Actinobacteria (тип Actinobacteriota) на 6,1 %. Следует отметить, что клопиралид, который применялся в нашем случае, спровоцировал подкисление почвы до величины pH = 5,4 . Это и привело к активизации роста микроорганизмов, которые тяготеют к местообитаниям с кислой и слабокислой реакцией. На почвах с биочаром отмечалось снижение представителей данных классов почти до контрольного уровня, что, скорее всего, связано с сорбционной активностью биоугля и повышением величины pH.

Гербицидное загрязнение почвы привело к полному отсутствию бактерий классов Thermoleophilia, Coriobacteriia, Acidimicrobiia (тип Actinobacteriota), Gemmatimonadetes (тип Gemmatimonadota). Очистка почвы биосорбентом восстановила численность этих представителей почвенной микробиоты (рис. 3).

Таксономический анализ почвенной прокариотической микробиоты на уровне порядка показал, что в исходной почве преобладали микроорганизмы Veillonellales-Selenomonadales и Oscillospirales. После обработки гербицидом Oscillospirales исчезли совсем. Численность Veillonellales-Selenomonadales уменьшилась в 6,7 раза. Ремедиация биочаром привела к восстановлению численности этих бактерий в почве (рис.4). Следует отметить, что последействие гербицида спровоцировало исчезновение из почвенного сообщества 40 % групп микроорганизмов на уровне порядка.

Но отмечено высокое содержание Lactobacillales (рис.4). Представители этого порядка известны своей антагонистической активностью, устойчивостью к высокой кислотности среды, позволяющим им успешно конкурировать с другими микроорганизмами. Возможно, стрессовые условия, спровоцированные гербицидом, активизировали их рост. Лимитирующим фактором, скорее всего, стала кислотность среды, которая снизилась после внесения гербицида. В процессе роста Lactobacillales пероксид водорода аккумулировался в почве, оказывая ингибирующее действие на рост каталазоположительных бактерий за счет сильного окислительного действия.

Такая же тенденция сохраняется и на уровне семейств. Выявленные доминанты в исходном грунте Veillonellaceae и Ruminococcaceae. Но гербицидная обработка почвы привела к исчезновению большинства микроорганизмов. Так, из 23 представителей, обнаруженных в чистом почвенном образце, 15 отсутствовали. При этом более 50 % из них приходилось на аэробы (рис. 5).

В то же время присутствие гербицида в почве активизировало рост Clostridiaceae, Bifidobacteriaceae. Представители семейств Lactobacillaceae, Prevotellaceae, Dietziaceae, Moraxellaceae, Erysipelotrichaceae, отсутствовавшие ранее, появились в почве с гербицидом.

Внесение в загрязненную гербицидом почву биочара в целом способствовало восстановлению почвенного микробного сообщества. Из 15 исчезнувших семейств микроорганизмов восстановилось 60 % (рис. 5).

Общая численность всех идентифицированных таксонов на уровне рода обработана с помощью диаграммы Парето (рис. 6). Обработка экспериментальных данных данным способом позволила установить, что доля подверженных влиянию гербицида прокариот составила 71,4 %. Исчезли полностью из почвенного микробного сообщества 32 %, восстановились после внесения биочара – 39,3 %. Наблюдалось возобновление практически до первоначального значения микроорганизмов родов Veillonella, Faecalibacterium, Gaiella, Ilumatobacter, Gemmatimonas, численность Azotobacter увеличилась в 7,3 раза. Добавление в почву биоугля из осадков сточных вод и древесных опилок достоверно активизировало почвенную микробиоту.

Анализ данных диаграммы (рис. 6) показывает, что в почве, подвергнутой обработке гербицидом снижается или полностью исчезает доля микроорганизмов, проявляющих каталазную активность. Общеизвестно, что каталазная активность почв рассматривается как показатель активности почвенной микрофлоры. В определенной степени она может выступать маркером ухудшения экологической обстановки. Например,

представители рода Gaiella, известные как каталазоположительные бактерии, отсутствовали в почве с гербицидом (рис. 6, б). А после обработки почвы биоуглем их численность восстановилась (рис. 6, в).

Intrasporangium, также будучи каталазоположительными, сократились более чем в 4 раза под действием гербицида. Очистка почвы биосорбентом позволила возродить их популяцию на 56 %.

Появление в загрязненной пестицидом почве большого количества Lactobacillus и увеличение доли Bifidobacterium скорее всего связано с их способностью дезактивировать канцерогенные вещества. После ландфарминга почвы биочаром они не обнаруживались.

Интересно отметить, что представители рода Gemmatimonas обнаружены в почве сравнительно недавно. Они имеют много различных филогенетических признаков, что говорит о наличии большого числа уникальных ферментов и метаболических путей.

Также было оценено α-разнообразие каждого из исследуемых образцов с применением индекса Шеннона. В результате воздействия гербицида произошло снижение видового разнообразия микробного сообщества почвы. Если в исходном почвенном образце его значение составляло 2,2, то после гербицидного воздействия он снизился в 1,5 раза. Однако, очистка почвы биочаром достоверно восстанавливала почвенный микробиом, при этом индекс Шеннона составил 2,4.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что выявленные особенности структуры рассмотренных прокариотных сообществ, связанные с гербицидным загрязнением, могут быть использованы в качестве биоиндикаторов состояния почвы для оценки устойчивости почвенных экосистем при воздействии на них пестицидов. Полученная информация о процессах, происходящих в микробных сообществах в результате гербицидного воздействия, исследование направленности их сукцессий в почве могут быть использованы для активизации почвенной микробиоты.

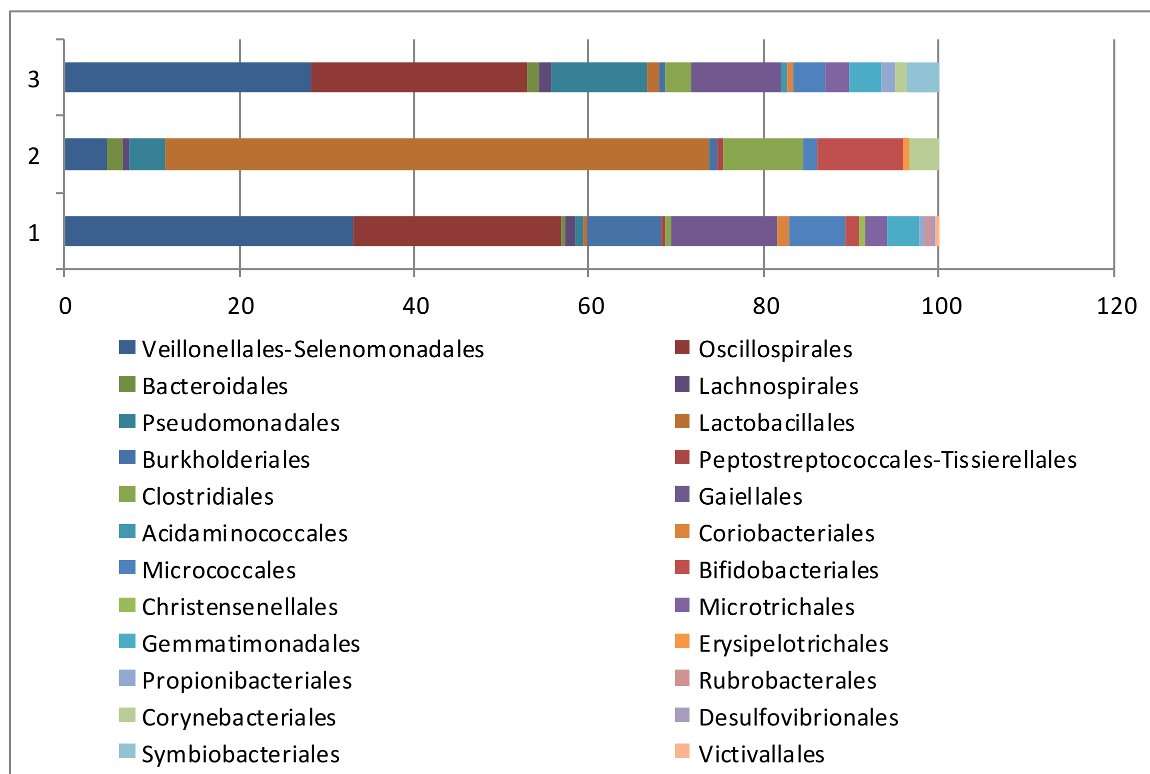


Рис. 4. Таксономический профиль почвенного микробиома, определенный до уровня порядка, %:
1 – почва; 2 – почва, обработанная гербицидом; 3 – почва, обработанная гербицидом, + биочар
Figure 4. Taxonomic profile of the soil microbiome, determined to the level of the order, %:
1 – soil; 2 – soil treated with herbicide; 3 – soil treated with herbicide + biochar
(Источник: собственные экспериментальные данные)

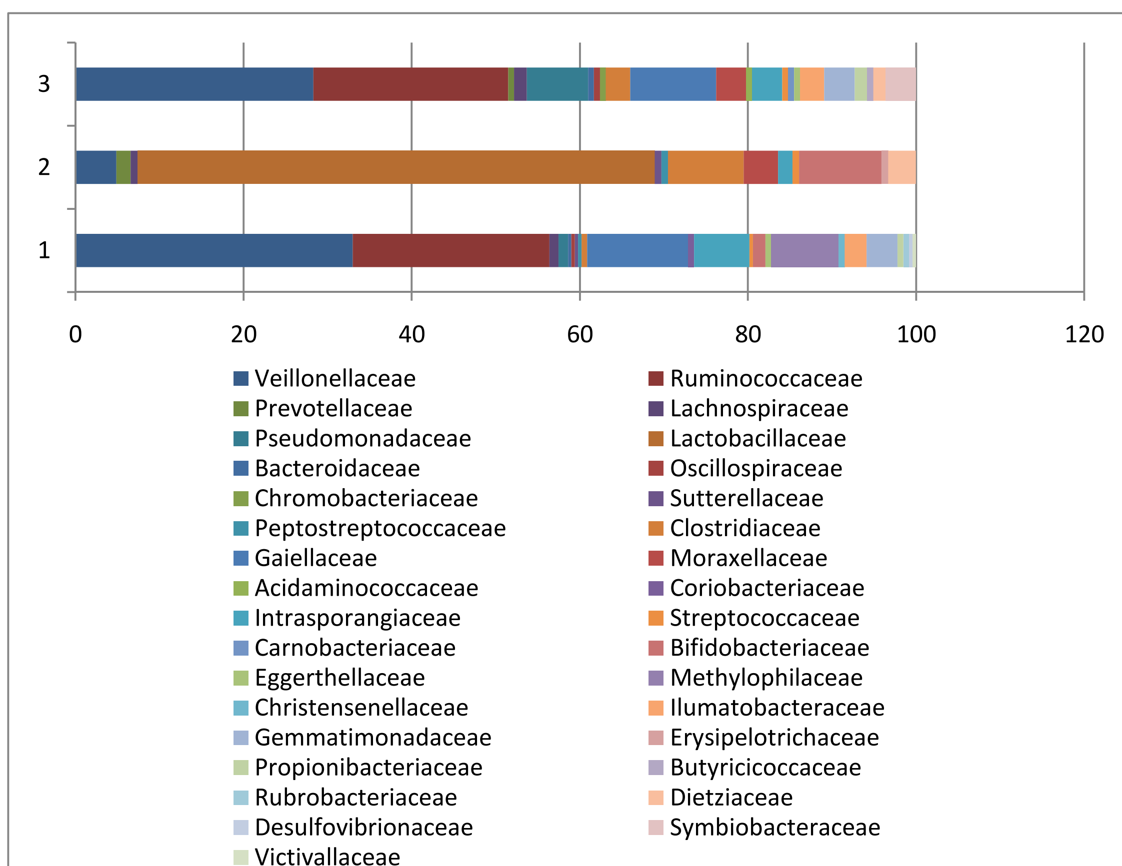
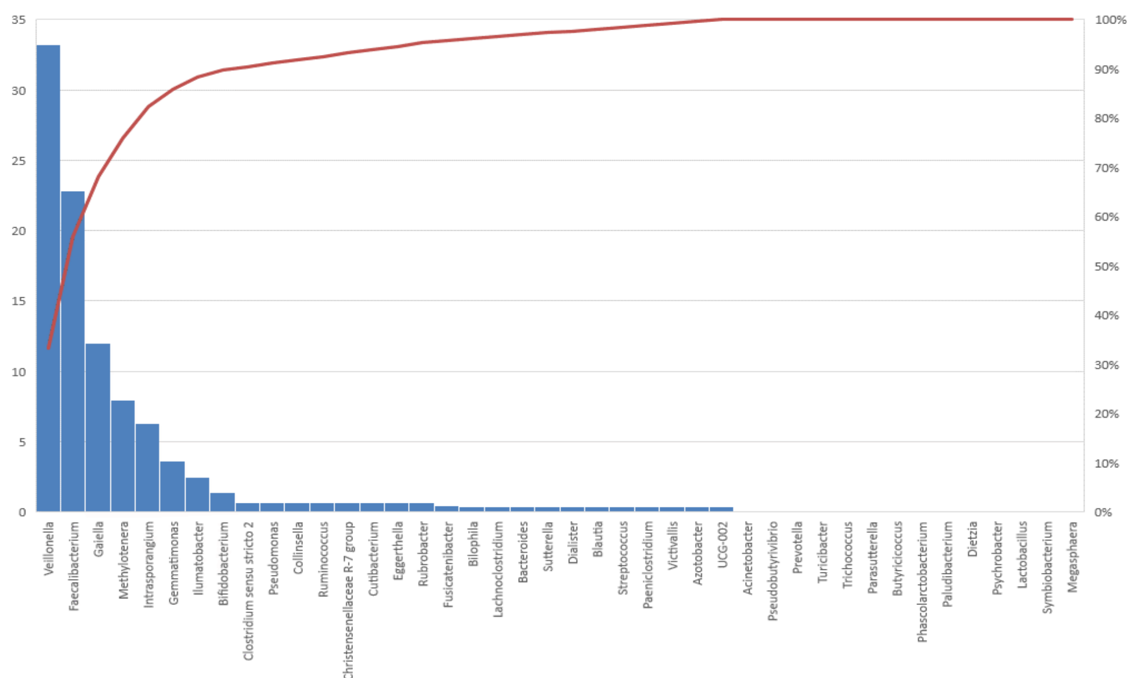
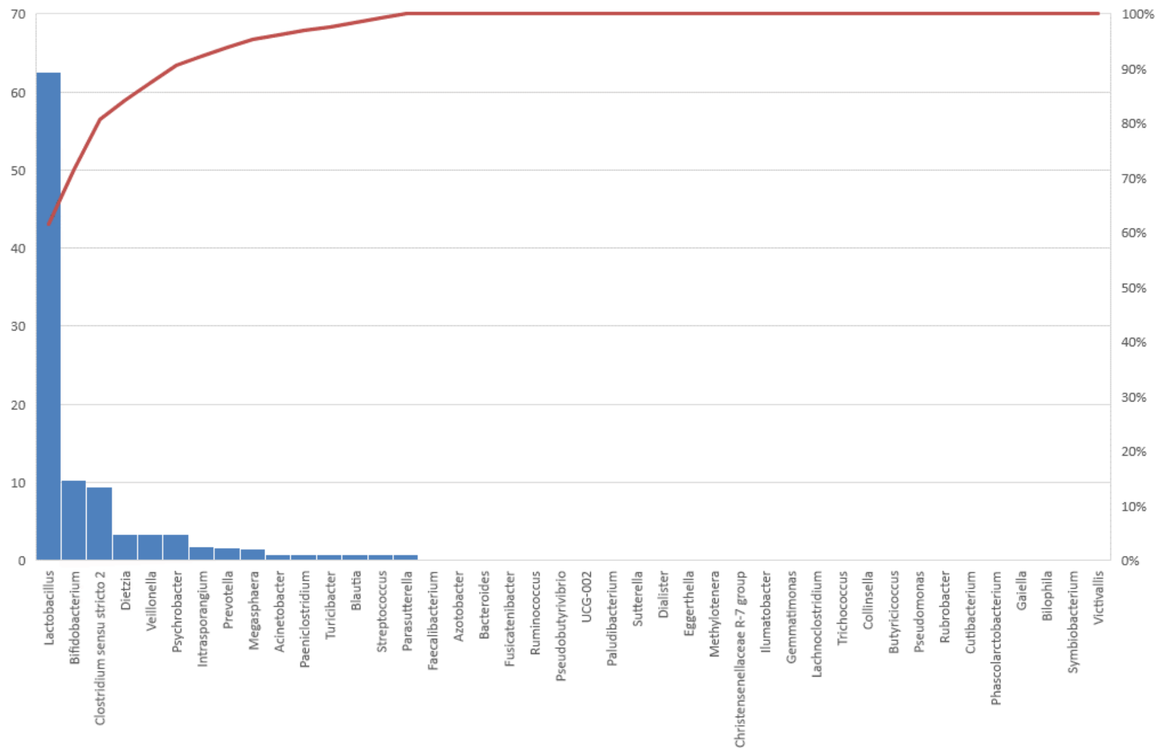


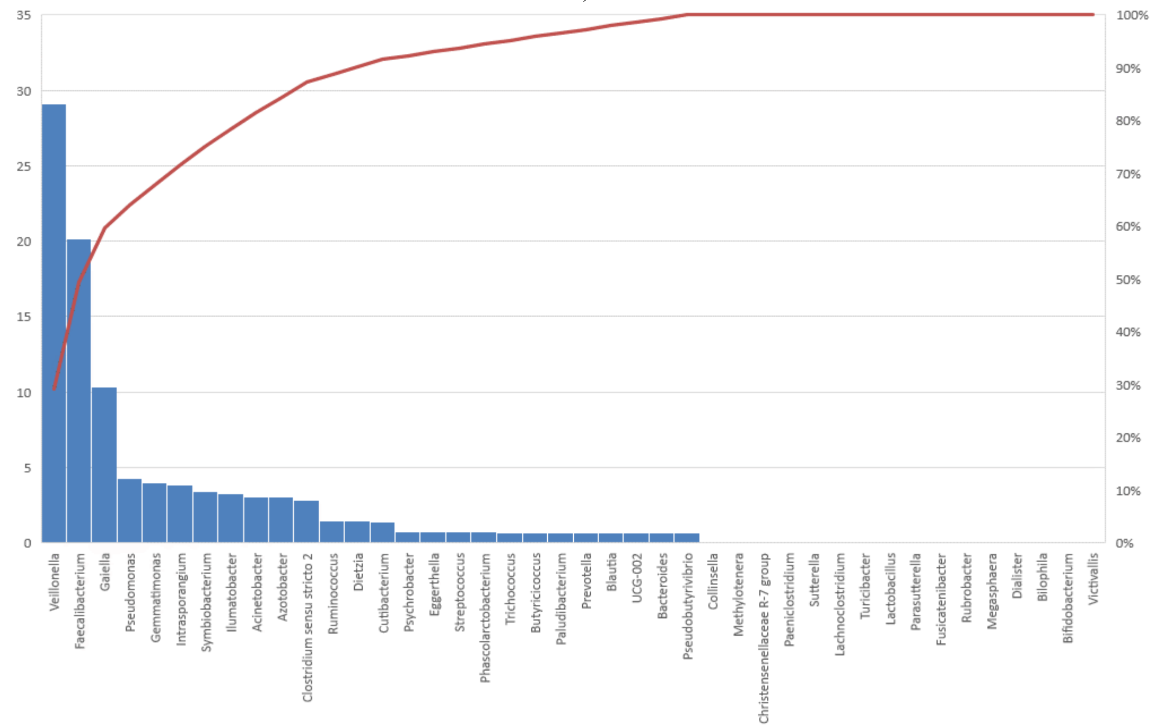
Рис. 5. Таксономический профиль почвенного микробиома, определенный до уровня семейства, % :
1 – почва; 2 – почва, обработанная гербицидом; 3 – почва, обработанная гербицидом, + биочар
Figure 5. Taxonomic profile of the soil microbiome determined to the family level, % :
1 – soil; 2 – soil treated with herbicide; 3 – soil treated with herbicide + biochar
Источник: собственные экспериментальные данные
Source: own experimental data



а)



б)



в)

Рис. 6. Диаграмма Парето средней концентрации бактерий в почве (а), гербициде (б) и биочаре (в)
Figure 6. Pareto diagram of the average concentration of bacteria in soil (a), herbicide (b) and biochar (c)
Source: own experimental data

Список литературы

1. Piotrowska-Długosz A., Breza-Boruta B., Długosz, J. Spatio-temporal heterogeneity of soil microbial properties in a conventionally managed arable field. Journal of Soils and Sediments .2019; 19:345–355.

2. Савич В.И., Мосина Л.В., Норовсурэн Ж., Сидоренко О.Д., Аникина Д.С. Микробиологическая активность почв как фактор почвообразования. Международный сельскохозяйственный журнал. 2019;1: 38-42. DOI: 10.24411/2587-6740-2019-11010.

3. Стифеев А.И., Никитина О.В., КемовК.Н. Состояние почв Центрального Черноземья и необходимость воспроизводства их плодородия. Вестник курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018; 1:10-14.

4. Кулагина В.И., Грачев А.Н., Шагидуллин Р.Р., Рязанов С.С., Сунгатуллина Л.М., Забелкин С.А., Кольцова Т.Г. Влияние биоугля на структуру почвы и содержание форм калия. Аграрный научный журнал. 2019;1:16-20.

5. Кулагина В.И., Грачев А.Н., Рязанов С.С., Кольцова Т.Г., Сунгатуллина Л.М., Рупова Э.Х. Оценка фитотоксичности как первый этап эколого-биологической оценки влияния продукта пиролиза илов сточных вод на почвы. Вестник Технологического университета. 2018; 21(1):164-168.

6. Кулагина В.И., Сунгатуллина Л.М., Грачев А.Н., Шагидуллин Р.Р., Рязанов С.С, Забелкин С.А., Кольцова Т.Г. Оценка воздействия биоугля на микробиологические и некоторые физико-химические показатели серой лесной почвы. Российский журнал прикладной экологии. 2018;2 (14):21-25.

7. Shareef T. M. E., Zhao B. Review Paper: The Fundamentals of Biochar as a Soil Amendment Tool and Management in Agriculture Scope: An Overview for Farmers and Gardeners. Journal of Agricultural Chemistry and Environment. 2017;6:38-61. DOI: 10.4236/jacen.2017.61003

8. Vijay V., Shreedhar S., Adlak K., Payyanad S., Sreedharan V, Gopi G., Voort T. S, Malarvizhi P., Yi S., Gebert J., Aravind P.V. Review of Large-Scale Biochar Field-Trials for Soil Amendment and the Observed In fl uences on Crop Yield Variations. Review of Biochar Field Trials.2021;9:2-21. DOI: 10.3389/fenrg.2021.710766.

9. Pallarés J., González-Cencerrado A., Arauzo I. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. Biomass and Bioenergy. 2018;115:64-73.

10. Cheng J., Lee X., Gao W., Chen Y., Tang Y. Effect of biochar on the bioavailability of difenoconazole and microbial community composition in a pesticide-contaminated soil. Applied Soil Ecology.2017;185-192.

11. *Передерий С.* Что такое биоуголь или гидротермальная карбонизация биомассы? Режим доступа:Biowatt.-URL:http://www.biowatt.com.ua/informatsiya/chto-takoe-biougol-ili-gidrotermalnaya-karbonizatsiya-biomassy/

12. Jien S.-H., Kuo Y.-L., LiaoSen C.-S., Wu Y.-T., Wu A. D., Tsang D. C. W. et al. Effects of Field Scale *In Situ* Biochar Incorporation on Soil Environment in a Tropical Highly Weathered Soil. *Environ. Pollut.* 2021;19(4):272. DOI:10.1016/j.envpol.2020.116009.

13. Blanco-Canqui H. Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Sci. Soc. America J. 2017;*81:687–711. DOI:10.2136/sssaj2017.01.0017

14. Дурова, А.С. Биоуголь для плодородия: сайт – АгроБизнес.2019. Режим доступа: https://agbz.ru/articles/biougol-dlya-plodorodiya/?

15. Мухин В.М., Спиридонов Ю.Я. Оздоровление почв, загрязненных пестицидами, с помощью углеадсорбционных технологий. Аграрная наука. 2019; 2: 156-159. DOI: 10.32634/0869-8155-2019-326-2-156-159.

16. Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромычкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов. Почвоведение.2019;10:1172–1184. DOI: 10.1134/S0032180X19100113.

17. Брындина Л.В., Бакланова О.В. Восстановление почвы от гербицидного загрязнения с помощью биочара из осадков сточных вод и древесных опилок. Экология и промышленность России. 2021; 25(6):32-37. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-6-32-37.

18. Бегматов Ш.А., Селицкая О.В., Васильева Л.В., Берестовская Ю.Ю., Манучарова Н.А., Дренова Н.В. Морфофизиологические особенности некоторых культивируемых бактерий засоленных почв Приаралья. Почвоведение.2020;1:81-88.

19. Абакумов Е.В., Лойко С.В., Истигечев Г.И., Кулемзина А.И., Лащинский Н.Н., Андронов Е.Е., Лапидус А.Л. Почвы черневой тайги Западной Сибири — морфология, агрохимические особенности, микробиота. Сельскохозяйственная биология.2020;55(5):1018-1039.

References

1. Piotrowska-Długosz A., Breza-Boruta B., Długosz, J. Spatio-temporal heterogeneity of soil microbial properties in a conventionally managed arable field. Journal of Soils and Sediments .2019; 19:345–355.

2. Savich V.I., MosinaL.V., NorovsurenZH., Sidorenko O.D., Anikina D.S. Mikrobiologicheskaya aktivnost' pochv kak faktor pochvoobrazovaniya. Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal. 2019;1:38-42.DOI: 10.24411/2587-6740-2019-11010.

3. Stifeev A.I., Nikitina O.V., KemovK.N. Sostoyanie pochv Central'nogo CHernozem'ya i neobhodimost' vosproizvodstva ih plodorodiya. Vestnik kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. 2018;1:10-14.

4. Kulagina V.I., Grachev A.N., SHagidullin R.R., Ryazanov S.S., Sungatullina L.M., Zabelkin S.A., Kol'cova T.G. Vliyanie biouglya na strukturu pochvy i soderzhanie form kaliya. Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2019;1:16-20.

5. Kulagina V.I., Grachev A.N., Ryazanov S.S., Kol'cova T.G., Sungatullina L.M., Rupova E.H. Ocenka fitotoksichnosti kak pervyj etap ekologo-biologicheskoj ocenki vliyaniya produkta piroliza ilov stochnyh vod na pochvy. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2018; 21(1):164-168.

6. Kulagina V.I., Sungatullina L.M., Grachev A.N., SHagidullin R.R., Ryazanov S.S, Zabelkin S.A., Kol'cova T.G. Ocenka vozdejstviya biouglya na mikrobiologicheskie i nekotorye fiziko-himicheskie pokazateli seroj lesnoj pochvy. Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii. 2018;2 (14):21-25.

7. Shareef T. M. E., Zhao V. Review Paper: The Fundamentals of Biochar as a Soil Amendment Tool and Management in Agriculture Scope: An Overview for Farmers and Gardeners. Journal of Agricultural Chemistry and Environment. 2017;6:38-61. DOI: 10.4236/jacen.2017.61003

8. Vijay V., Shreedhar S., Adlak K., Payyanad S., Sreedharan V, Gopi G., Voort T. S, Malarvizhi P., Yi S., Gebert J., Aravind P.V. Review of Large-Scale Biochar Field-Trials for Soil Amendment and the Observed In fl uences on Crop Yield Variations. Review of Biochar Field Trials.2021;9:2-21. DOI: 10.3389/fenrg.2021.710766.

9. Pallarés J., González-Cencerrado A., Arauzo I. Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. Biomass and Bioenergy. 2018;115:64-73.

10. Cheng J., Lee X., Gao W., Chen Y., Tang Y. Effect of biochar on the bioavailability of difenoconazole and microbial community composition in a pesticide-contaminated soil. Applied Soil Ecology.2017;185-192.

11. Prederij S.CHto takoe biougol' ili gidrotermal'naya karbonizaciya biomassy? Rezhim dostupa: Biowatt.- URL:http://www.biowatt.com.ua/informatsiya/chto-takoe-biougol-ili-gidrotermalnaya-karbonizatsiya-biomassy/

12. Jien S.-H., Kuo Y.-L., LiaoSen C.-S., Wu Y.-T., Wu A. D., Tsang D. C. W. et al. Effects of Field Scale In Situ Biochar Incorporation on Soil Environment in a Tropical Highly Weathered Soil. Environ. Pollut. 2021;19(4):272. DOI:10.1016/j.envpol.2020.116009.

13. Blanco-Canqui H. Biochar and Soil Physical Properties. Soil Sci. Soc. America J. 2017;81:687–711. DOI:10.2136/sssaj2017.01.0017

14. Durova, A.S. Biougol' dlya plodorodiya: sajt – AgroBiznes.2019. Rezhim dostupa: https://agbz.ru/articles/biougol-dlya-plodorodiya/?

15. Muhin V.M., Spiridonov YU.YA. Ozdorovlenie pochv, zagryaznennyh pesticidami, s pomoshch'yu ugleadsorbcionnyh tekhnologij. Agrarnaya nauka. 2019; 2: 156-159. DOI: 10.32634/0869-8155-2019-326-2-156-159.

16. Semenov V.M., Pautova N.B., Lebedeva T.N., Hromychkina D.P., Semenova N.A., Lopes de Gerenyu V.O. Razlozhenie rastitel'nyh ostatkov i formirovanie aktivnogo organicheskogo veshchestva v pochve inkubacionnyh eksperimentov. Pochvovedenie.2019;10:1172–1184. DOI: 10.1134/S0032180X19100113.

17. Bryndina L.V., Baklanova O.V. Vosstanovlenie pochvy ot gerbicidnogo zagryazneniya s pomoshch'yu biochara iz osadkov stochnyh vod i drevesnyh opilok. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2021; 25(6):32-37. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-6-32-37.

18. Begmatov SH.A., Selickaya O.V., Vasil'eva L.V., Berestovskaya YU.YU., Manucharova N.A., Drenova N.V. Morfofiziologicheskie osobennosti nekotoryh kul'tiviruemyh bakterij zasolennyh pochv Priaral'ya. Pochvovedenie.2020;1:81-88.

19. Abakumov E.V., Lojko S.V., Istigechev G.I., Kulemzina A.I., Lashchinskij N.N., Andronov E.E., Lapidus A.L. Pochvy chernevoj tajgi Zapadnoj Sibiri — morfologiya, agrohimicheskie osobennosti, mikrobiota. Sel'skohozyajstvennaya biologiya.2020;55(5):1018-1039.

Сведения об авторах

🖂*Бporындина Лариса Васильевна* – доктор сельско-хозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: bryndinv@mail.ru.

Свистова Ирина Дмитриевна – доктор биологических наук, профессор кафедры биологии растений и животных ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет», ул. Ленина, 86, г. Воронеж, Российская Федерация, 394043, e-mail: i.svistova@mail.ru.

Бакланова Ольга Васильевна – старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и правовых отношений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: baklanova.olga.72@mail.ru.

Information about the authors

🖂*Bryndina Larisa Vasilievna* – Doctor of Agricultural Sciences, professor, chief researcher, laboratory of industrial biotechnology Research Institute ITFC FSBEI VD Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: bryndinv@mail.ru.

Svistova Irina Dmitrievna – Doctor of Biological Sciences, professor of the Department of Plant and Animal Biology, Voronezh State Pedagogical University, Lenin St., 86, Voronezh, Russian Federation, 394043, e-mail: i.svistova@mail.ru .

Baklanova Olga Vasilievna – Senior Lecturer of the Department of Life Safety and Legal Relations FSBEI VD Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: baklanova.olga.72@mail.ru .